

Comment ça marche ?

Les transmissions radio-numériques

6 - Le canal de transmission

Par le radio-club F6KRRK

Le choix d'une méthode de transmission numérique dépend de différentes contraintes liées au cahier des charges numérique et au canal de propagation. Nous allons examiner les conséquences amenées par l'imperfection de ce dernier.

Préambule

Dans les transmissions numériques, il existe deux familles de canaux de transmission : les liaisons physiques et les liaisons électromagnétiques. Pour les connexions entre terminaux fixes, les moyens filaires et par fibre optique (celui-là à plus de 95%) sont de plus en plus utilisés (téléphone IP, radio et TV interactives, etc). A court terme, les moyens radio ne seront plus utilisés que pour les liaisons avec les mobiles (radiotéléphonie en particulier) ou à très courte distance (bluetooth, Wi-Fi).

Cahier des charges numérique.

Concernant la transmission radio, nous trouvons au minimum ces paramètres :

- Débit utilisateur en bits/seconde (sans erreur).
- Longueur des trames à flot continu (un caractère ou un paquet = une trame).
- Taux de trames erronées (répartition dans le temps).
- Délai maximum d'acheminement (traitement émission + temps de propagation + traitement réception).
- Caractéristiques de fait du canal de transmission (contraintes amenées par les E/R et la propagation).

Canal de transmission.

Il est composé de trois parties : chaîne émission, canal de propagation et chaîne réception. Dans le domaine professionnel, le canal de transmission est défini par des normes (ETSI par ex.). Pour nous radioamateurs, ces normes sont très simplifiées et concernent la totalité d'une bande amateur. A l'intérieur de chaque bande, ce sont les radioamateurs eux-mêmes (IARU) qui définissent des "usages" librement acceptés par la communauté. Ces usages sont surtout organisationnels. Ainsi il n'existe aucune spécification formelle concernant le brouillage (QRM).

Chaîne émission.

Elle comprend la partie matérielle entre l'entrée des données brutes et la sortie HF. Principaux paramètres :

- PAR rayonnée (moyenne ou PeP) dans le cas d'un canal radio unique, ou densité spectrale de puissance (Watts par Hz de bande) dans le cas d'un étalement de spectre.
- Linéarité de la chaîne (IP3) ou chaîne à amplitude constante.
- Largeur du canal radio.
- Perturbation dans les canaux radio voisins (ACLR "Adjacent Channel Leakage Ratio", équivalent à la sélectivité en réception).

Pour nous radioamateurs, la transmission utilise un canal radio unique et la PAR est remplacée par la puissance de sortie de l'émetteur. La chaîne est soit linéaire (BLU) soit limitée (FM). Elle est imposée par le matériel prévu par ailleurs pour la phonie. L'utilisation d'une chaîne FM se fait en traitant la modulation numérique pour la rendre compatible avec une modulation de fréquence. L'utilisation d'une chaîne BLU se fait en générant une ou plusieurs sous porteuses en bande de base. Ceci permet toutes les modulations numériques, qu'elles soient à amplitude constante ou non (avec plus ou moins de rendement). Nous nous intéresserons en particulier à la chaîne BLU car c'est elle qui est utilisée en HF, où par ailleurs la propagation joue un rôle crucial.

Dans le domaine professionnel, les choses sont plus simples car en général la chaîne émission est adaptée au procédé de transmission en fonction des normes applicables ⁽¹⁾.

Chaîne émission BLU.

Considérons le synoptique simplifié de la figure 1.

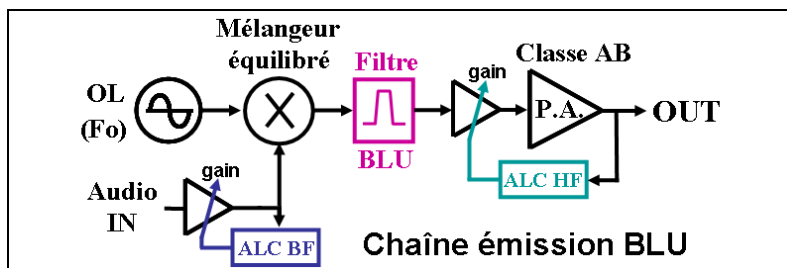


Figure 1 : Principe d'une chaîne émission BLU

- Au démarrage de toute émission, il est nécessaire de commencer la transmission par un préambule avec un niveau d'amplitude crête constant pour laisser le temps aux ALC de réagir.
- Des limitations sont liées au filtre BLU. En effet, celui-ci est en général un filtre à quartz de type Tchebychev de 4 à 8 pôles. En conséquence il y aura une ondulation dans la bande passante, ce qui n'est pas trop gênant, mais surtout, il y aura des distorsions de phase très importantes aux extrémités de bande. Ceci sera gênant pour toutes les modulations de phase et aura comme conséquence, d'une part de réduire la bande utilisable et d'autre part d'obliger à centrer le spectre au milieu de cette bande. Nous avons sur la figure 2 la réponse en amplitude d'un filtre BLU et son temps de propagation de groupe (retard lié à la rotation de phase d'un signal CW en fonction de sa fréquence).

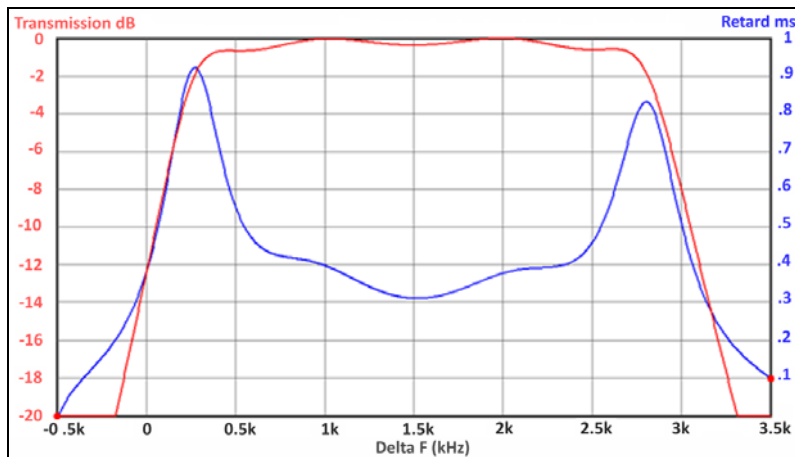


Figure 2 : Temps de propagation de groupe pour un filtre BLU+ (4 pôles) (2 col)

Sans l'utilisation d'une méthode d'égalisation ⁽²⁾, seule une petite partie de la bande du filtre BLU peut être exploitable pour une modulation de phase, donc faibles débits ⁽³⁾. Il n'y a pas de limitation pour le *n*FSK.

- Pour toutes les modulations à amplitude variable, il faut prendre en compte la linéarité en amplitude de l'émetteur. Si une faible linéarité peut être acceptée avec la phonie, pour les modulations numériques complexes comme le *n*QAM, il peut être nécessaire de l'augmenter en réduisant la puissance PeP d'émission (mi-puissance pour un émetteur phonie BLU radioamateur).

Chaîne réception BLU.

Considérons le synoptique simplifié de la figure 3.

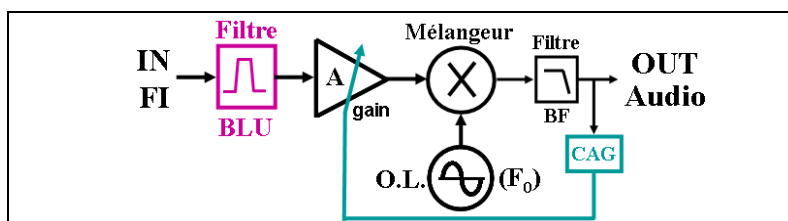


Figure 3 : Principe d'une chaîne de réception BLU (partie FI)

Il comprend une chaîne de réception BLU depuis l'entrée du filtre de canal jusqu'à la sortie en bande de base audio. Ce système ne suscite aucune remarque particulière si le canal numérique occupe la totalité du canal BLU, sauf que la distorsion de phase du filtre BLU réception s'ajoute à celle du filtre émission. Mais si le canal numérique est nettement plus étroit que le canal BLU, nous allons avoir les effets dus à ce que l'on appelle "le filtrage de canal post-CAG".

Prenons un exemple avec un canal télégraphique ("CW" radioamateur). Donnons-nous un cahier des charges :

- Débit symbole = 20 bauds (20 mots/minute).
- Largeur filtre de canal = 200 Hz (pour que la tonalité reste "écoutable").
- Réjection canal adjacent = 50 dB (pour un SINAD de 10 dB).
- Largeur de canal = 300 Hz (en tenant compte du facteur de forme du filtre de canal).

On suppose que les émissions reçues sont compatibles avec ce cahier des charges (ACLR > 50 dB), car on ne peut rien faire en réception pour contrer leurs effets quand elles constituent les "brouilleurs".

En réception, le filtrage de canal sera fait en bande de base (filtre BF numérique). Alors un filtre BLU de 2,4 kHz de largeur contiendra 8 canaux CW de 300 Hz consécutifs.

Supposons que le signal qui nous intéresse arrive avec un niveau S2, et supposons que dans un canal adjacent, il existe un autre signal (le brouilleur) avec un niveau S9.

Comme ils passent tous les deux dans le filtre BLU, la CAG du récepteur se calera sur le signal S9, atténuant notre signal de 7 points S, soit 42 dB. Si S2 correspond à un rapport S/B de 12 dB en FI, la CAG nous abaissera notre signal à 30 dB sous le bruit. Le filtrage BF en réduisant la bande de 8 fois nous diminuera bien le bruit de 9 dB ($10 \cdot \log(8)$), mais notre signal restera encore 22 dB sous le bruit, donc indécodable.

Une solution consiste à supprimer la CAG. Alors, nous allons rencontrer un autre problème. Si nous ajustons (manuellement) le gain HF pour "sortir" notre signal du bruit, le signal brouilleur se situera 42 dB au dessus, demandant au récepteur une dynamique post-filtrage de canal d'au moins 50 dB. C'est 10 dB au dessus des récepteurs courants qui satureront sur le signal brouilleur, ce qui masquera le signal utile (affaiblissement et transmodulation). Bref, il sera quasiment impossible de régler le gain HF et nous raterons le DX de notre vie.

Nous voyons que les performances de ce système sont très liées à la qualité du récepteur dans des domaines habituellement exclus de ses caractéristiques.

La véritable solution technique consisterait à remplacer le filtre BLU par un filtre CW de 200 Hz de largeur. Mais alors, on ne pourrait plus effectuer une analyse spectrale du signal en bande de base pour voir ce qui se passe autour. Il faudrait construire un véritable récepteur panoramique connecté avant le filtre de canal. Solution professionnelle trop chère pour un radioamateur.

Les mêmes problèmes existent avec les récepteurs "SDR" classiques (conversion directe analogique avec filtrage de canal et traitement numérique en bande de base). De fait, la bande passante instantanée est très large (15-30 kHz) avec un filtrage "mou" (2^{ème} ordre au mieux). Alors, la partie analogique du récepteur (conversion, amplification BF) "ratisse large" (beaucoup de stations reçues simultanément) et nous aurons des problèmes de transmodulation et d'intermodulation. Peu importe que la dynamique BF (amplitude, filtrage) soit plus élevée qu'avec un récepteur classique ⁽⁴⁾.

Les antennes

Pour être complet il conviendrait d'inclure dans les chaînes E/R les systèmes antennaires. En pratique, ils interviennent pour les transmissions à large bande spectrale qui ne sont pas employées par les radioamateurs. On pourrait tout juste avoir des problèmes de bande passante pour les antennes très raccourcies ayant un bon rendement pour les bandes inférieures au 80m.

Dans le prochain "Comment ça marche" on dissertera sur le canal de propagation qui pour nous, radioamateurs, se complexifie avec la propagation ionosphérique.

La Rubrique "Comment ça marche" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@orange.fr".

Notes :

- 1) *Pour les domaines militaires et associés, la problématique est proche de celle du domaine radioamateur.*
- 2) *L'égalisation consiste à faire précéder les données par une séquence particulière connue qui permet au récepteur de déterminer la fonction de transfert du canal de transmission (émetteur, propagation et récepteur). A la réception on applique une*

fonction inverse aux données en bande de base avant de les décoder. Nous y reviendrons.

- 3) Soit ici 1,8 kHz sur 2,7 kHz. Et encore, ce n'est qu'un quatre pôles ! Nous verrons dans un prochain "Comment ça marche" la parade utilisée pour contrer cet inconvénient.*
- 4) Concernant les performances d'une chaîne c'est le maillon le plus faible qui compte, et dans les récepteurs SDR, le maillon faible se situe dans la partie analogique devant la conversion A/N. Il faudrait plusieurs pages pour développer cette problématique.*